

## РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ МИКРОСХЕМ В МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОРПУСАХ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОТОНОВ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

А.С. Якушевич<sup>1)</sup>, С.Б. Ластовский<sup>1)</sup>, Ю.В. Богатырев<sup>1)</sup>  
С.С. Грабчиков<sup>1)</sup>, Н.А. Василенков<sup>2)</sup>, А.Ю. Максимов<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>ГО "НПЦ НАН Беларуси по материаловедению", 220072, Беларусь, Минск, ул. П.Бровки, 19,  
yakushevich@ifftp.bas-net.by

<sup>2)</sup>ЗАО «ТЕСТПРИБОР», Москва, Россия

С помощью программного пакета GEANT4 проведен расчет поглощенных доз кристаллом Si при облучении протонами космического пространства микросхем в металлокерамических корпусах типа H04.16-1B, дополнительно защищенных экранами на основе композита W-Cu. Рассмотрены варианты экранов в виде дополнения только верхней и нижней пластин к корпусу, а также сплошной оболочки, закрывающей всю поверхность корпуса. Показано, что накопленная кристаллом Si доза при неполной защите больше по сравнению с полной в 1.05 раза для протонов естественных радиационных поясов Земли, в 1.02 раза — галактических космических лучей и 1.1 раза — солнечных космических лучей СКЛ. На зависимостях поглощенной дозы от энергии обнаружены два пика Брэгга, что обусловлено существенным различием массовой толщины крышек и оснований стандартных металлокерамических корпусов микросхем.

### Введение

При использовании стандартных материалов конструкционной защиты космических аппаратов (КА) (алюминий и его сплавы) уровни радиационных воздействий в космическом пространстве (КП) могут оказываться все еще достаточно высокими, поэтому для наиболее уязвимых элементов используют локальную защиту. Она представляет собой дополнительный экран для защиты только критичных узлов и элементов аппаратуры КА и не ведет к серьезному увеличению массы или габаритов блоков. В этой связи разрабатываются специальные корпуса, с интегрированными в их конструкцию экранами радиационной защиты (ЭРЗ) [1]. В настоящее время разработкой материалов для ЭРЗ занимаются многие производители [1–5]. За рубежом эти материалы носят условные названия: RAD-COAT (Space Electronics Inc., США), RAD-PAK (Maxwell Technologies Inc., США), WALOPACK (3D-Plus, Франция), X-Ray (Acstel Inc., США) [3–5]. Как правило, в составе спецкорпусов ЭРЗ защищают кристаллы ИМС со всех сторон. Однако порой возникает необходимость в усилении защиты уже готовых ИМС, где возможно использование ЭРЗ только в виде верхней и нижней дополнительных пластин к корпусу. Здесь возникает вопрос об эффективности такой неполной защиты по сравнению с полной — интегрированной ЭРЗ в спецкорпуса.

В данной работе с помощью программного пакета GEANT4 проведен расчет поглощенных доз кристаллом Si при облучении протонами КП ИМС в металлокерамических корпусах типа H04.16-1B для случаев полной и неполной защиты экранами на основе композита W-Cu.

### Методика моделирования

Расчет поглощенной дозы протонов КП проводился для кристалла кремния в виде параллелепипеда с размерами (3,1×2×0,46) мм<sup>3</sup>, совпадающими с размерами кристалла ряда ИМС. Кристалл Si помещался в стандартный металло-

керамический корпус типа H04.16-1B. Поглощенная доза определялась для случая, когда корпус ИМС дополнительно сверху и снизу закрывался пластинами из композита W-Cu толщиной 1.2 мм, а также, когда вся поверхность корпуса помещалась в защитную оболочку из композита W-Cu такой же толщины.

Материалом основания корпуса ИМС является высокотемпературная алюмооксидная керамика Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> плотностью 3,6 г/см<sup>3</sup>, а материалом верхней крышки — металлический сплав 29НК (ковар) толщиной 0,1 мм (рис. 1) и плотностью 8,2 г/см<sup>3</sup>. Элементный состав материала крышки включает: 29% никеля, 18% кобальта и остальное — 53% железа.

Дополнительная неполная защита корпуса ИМС выбрана в виде двух пластин из композита W-Cu (85% вольфрам, 15% медь) плотностью 16,5 г/см<sup>3</sup>. Верхняя часть корпуса закрывается пластиной с размерами (7,2×6,8×1,2) мм<sup>3</sup>, нижняя — (5,2×4,8×1,2) мм<sup>3</sup>. В случае полной защиты весь корпус окружен слоем композита W-Cu толщиной 1,2 мм.

Источник протонов выбран в виде сферы радиусом 10 мм, окружающей корпус с кристаллом ИМС. Геометрический центр сферы совпадает с началом координат (0, 0, 0). Сферические координаты точки вылета протона с поверхности сферы и радиус-вектор направления его движения задаются генератором случайных чисел с равномерным распределением.

Для моделирования были выбраны интегральные энергетические спектры плотности потока высокоэнергетических протонов (ВЭП) естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ), галактических космических лучей (ГКЛ) и солнечных космических лучей (СКЛ) в центре сферической защиты толщиной ≤1 г/см<sup>2</sup> (рис. 2).

Количество частиц во всех спектрах умножалось на 4π, чтобы при моделировании сохранить плотность падающего потока.

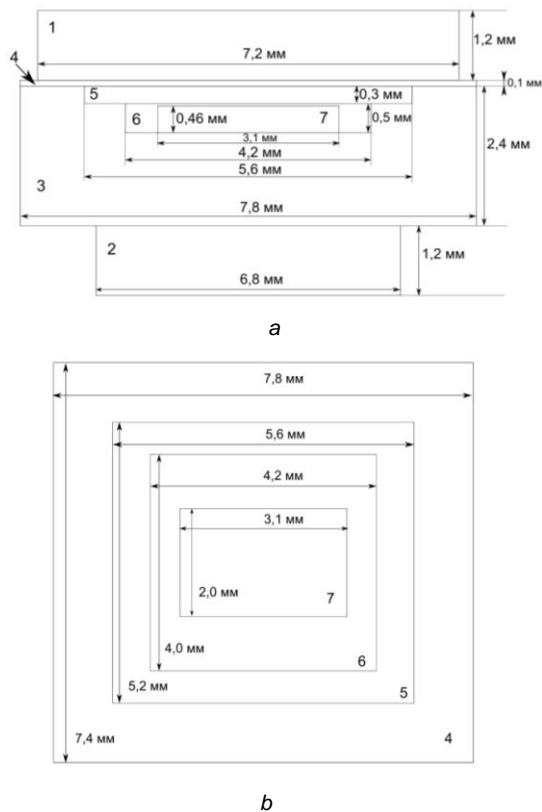


Рис. 1. Вид модельного образца сбоку (а) и сверху (b): 1 — верхняя неполная защита WCu; 2 — нижняя неполная защита WCu; 3 — керамический корпус; 4 — крышка; 5 и 6 — монтажные площадки для установки кристалла Si; 7 — кристалл Si.

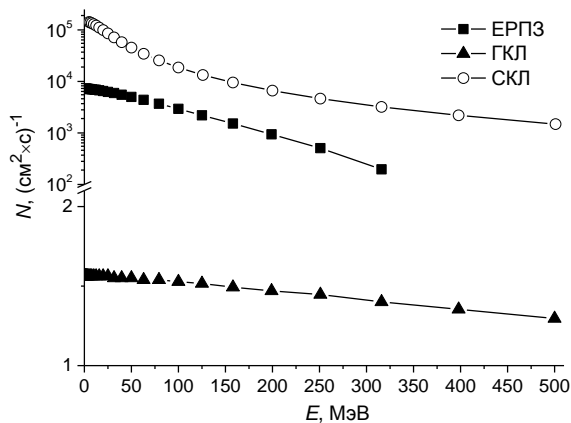


Рис. 2. Интегральные энергетические спектры плотности потока высокоэнергетических протонов.

Для протонов и электронов учитывались следующие физические процессы взаимодействия с веществом: тормозное излучение, многократное рассеяние и ионизация среды. При взаимодействии  $\gamma$ -квантов с веществом учитывались фотоэффект, комптоновское рассеяние и рождение электрон-позитронных пар.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 3 представлены результаты моделирования поглощенной дозы  $D$  в кристалле крем-

ния, облучаемого при дополнительных неполной и полной защитах корпуса протонами ЕРПЗ. В обоих случаях протоны с энергиями менее 20 МэВ полностью поглощаются как защитой, так и корпусом микросхем. С увеличением энергии протонов от 20 до 32 МэВ наблюдается монотонный рост значения  $D$  только в случае неполной защиты. Основной вклад в данный эффект вносят протоны, падающие на кристалл Si с боковых незащищенных сторон корпуса.

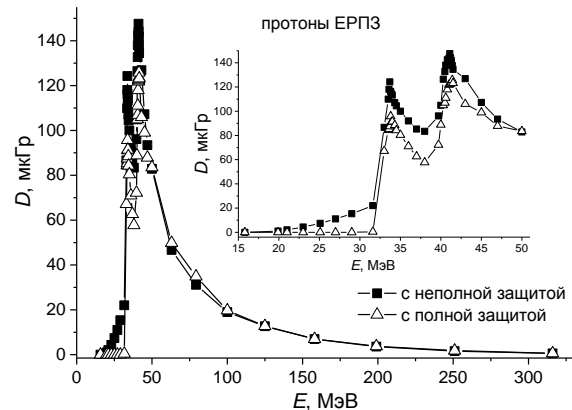


Рис. 3. Поглощенная доза в кристалле кремния ИМС, облучаемого при различных видах защиты корпуса протонами ЕРПЗ.

При энергиях протонов 32-50 МэВ на зависимостях  $D(E)$  наблюдаются два четко выраженных пика (рис. 3, вставка). Этот всплеск поглощенной дозы связан с тем, что удельные потери энергии тяжелых заряженных частиц возрастают с уменьшением их энергии и особенно резко перед остановкой в веществе в относительно узкой области, так называемого пика Брэгга [6]. Поэтому протоны, прошедшие защитные экраны, дают высокие радиационные дозы в конце пробега в защищаемом кристалле Si. В нашем случае наблюдается не один, а два пика Брэгга. Вероятнее всего, это связано с существенным различием массовых толщин керамического основания корпуса ( $5.8 \cdot 10^{-1}$  г/см<sup>2</sup>) и крышки ( $8.2 \cdot 10^{-2}$  г/см<sup>2</sup>). Первый пик соответствует поглощенной дозе от протонов, летящих к кристаллу микросхемы со стороны крышки, а второй — со стороны керамического корпуса.

Дальнейшее увеличение энергии протонов от 50 МэВ и выше ведет к монотонному снижению значения поглощенной дозы (рис. 3). При этом следует отметить, что в данной области энергий зависимости  $D(E)$  для различных вариантов защиты практически совпадают.

Из полученных результатов видно, что полная защита корпуса позволяет весьма незначительно уменьшить поглощенную дозу кристаллом Si при облучении протонами. Боковая защита корпуса полностью отсекает протоны с энергией меньше 32 МэВ и уменьшает амплитуду пиков Брэгга.

Ниже представлены аналогичные зависимости поглощенной дозы кристаллом ИМС, что и на рисунке 3, для случаев облучения протонами ГКЛ (рис. 4) и СКЛ (рис. 5). Видно, что различия в интегральных энергетических спектрах плотности

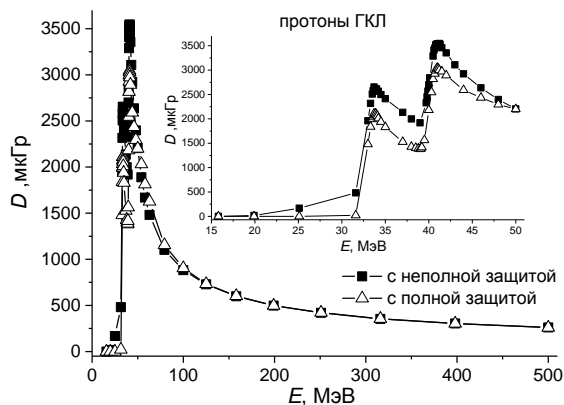


Рис. 4. Поглощенная доза в кристалле кремния ИМС, облучаемого при различных видах защиты корпуса протонами ГКЛ

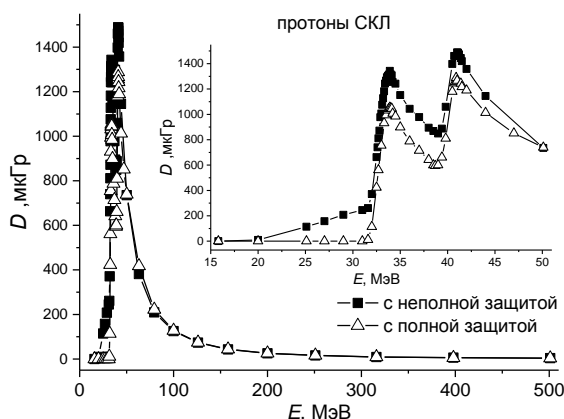


Рис. 5. Поглощенная доза в кристалле кремния ИМС, облучаемого при различных видах защиты корпуса протонами СКЛ

потока частиц не сказывается на характере зависимостей  $D(E)$ . Они имеют такой же вид, что и представленные на рисунке 3.

Оценим по результатам, представленным на рисунках 3–5, суммарные значения поглощенных доз для каждого испытания. Их значения определяются площадями под зависимостями  $D(E)$  и находятся путем интегрирования этих зависимостей. Для сравнения в таблице 1 приведены рассчитанные суммарные поглощенные дозы кристаллом ИМС для ВЭП ЕРПЗ, ГКЛ и СКЛ при разных вариантах защиты. Видно, что поглощенная доза при неполной защите больше полной для

протонов ЕРПЗ в 1.05 раза, протонов ГКЛ — 1.02 раза и протонов СКЛ — 1.1 раза.

Таблица 1. Суммарные поглощенные дозы кристаллом ИМС, облучаемого протонами ЕРПЗ, ГКЛ и СКЛ, при разных вариантах защиты.

Вид защиты	$D_p$ ЕРПЗ, мкГр/с	$D_p$ ГКЛ, мкГр/сут	$D_p$ СКЛ, мкГр/с
Неполная	5085.3	282175.2	45134.3
Полная	4845.9	277097.2	41189.7

### Заключение

Таким образом, с помощью программного пакета GEANT4 проведен расчет поглощенных доз кристаллом Si при облучении протонами космического пространства микросхем в металлокерамических корпусах типа N04.16-1В, дополнительно защищенных экранами на основе композита W-Cu. Рассмотрены варианты экранов в виде дополнения только верхней и нижней пластин к корпусу, а также сплошной оболочки, закрывающей всю поверхность корпуса. Показано, что накопленная кристаллом Si доза при неполной защите больше по сравнению с полной в 1.05 раза для протонов естественных радиационных поясов Земли, в 1.02 раза — галактических космических лучей и 1.1 раза — солнечных космических лучей СКЛ. На зависимостях поглощенной дозы от энергии обнаружены два пика Брэгга, что обусловлено существенным различием массовой толщины крышек и оснований стандартных металлокерамических корпусов микросхем.

Полученные результаты представляют интерес для разработчиков экранов локальной радиационной защиты микросхем с целью повышения уровня их радиационной стойкости.

### Список литературы

- Ефремов Г.А., Епифанский И.С., Ширяев А.В. и др. // Физика и химия обработки материалов 2003. №1 С. 33-37.
- Заболотный В.Т., Старостин Е.Е., Кочетков А.В. // Физика и химия обработки материалов 2008. №5. С. 15-18.
- www.spaceelectronics.com.
- www.maxwelltechnologies.com.
- www.3d-plus.com/radiation-assurance.php.
- Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. М.: Энергоатомиздат, 1993. 376 с.

### CALCULATION OF THE EFFICIENCY OF AN ADDITIONAL PROTECTION FOR THE CHIPS PACKED IN METAL-CERAMIC FRAMES SUBJECTED TO IRRADIATION BY SPACE PROTONS

H.S. Yakushevich<sup>1)</sup>, S.B. Lastovskii<sup>1)</sup>, Yu.V. Bogatyrev<sup>1)</sup>,  
S.S. Grabchikov<sup>1)</sup>, N.A. Vasilenkov<sup>2)</sup>, A.U. Maksimov<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>SSPA «Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus», 220072, Belarus, Minsk, P. Brovki Str., 19, e-mail: yakushevich@iftp.bas-net.by

<sup>2)</sup>JSC «TESTPRIBOR», Russian Federation, Moscow

On the base of a software package GEANT4 the calculation of doses absorbed by Si-crystals of IC chips N04.16-1V being in metal-ceramic packages and additionally protected with screens on the basis of W-Cu composite during irradiation with space protons has been carried out. Variants of screens in the form of the only upper and lower plates to the housing as well as a solid shell that covers the entire surface of the housing have been considered. It is shown that the cumulative dose absorbed by Si-crystals with incomplete protection is of 1.05 times higher than one for the total protection in the case of irradiation by protons of natural Earth's radiation belts and 1.02 times higher for irradiation with galactic cosmic rays and 1.1 times higher for irradiation with the solar cosmic rays. On the dependences of the absorbed dose on the energy two Bragg peaks were found, due to a significant difference in the mass thickness of the covers and bases of the standard metal-ceramic IC packages.